心理学报 2018, Vol. 50, No.2, 176−185
Acta Psychologica Sinica DOI: 10.3724/SP.J.1041.2018.00176

客体同维度特征的视觉工作记忆存储机制*

王 静 薛成波 刘 强

(辽宁师范大学脑与认知神经科学研究中心，大连 116029)

摘 要 客体理论认为视觉工作记忆的存储单位是客体，人类能够把组成物体的所有特征整合成一个单元进行记忆，不管这些特征是来自不同维度还是同一维度。然而同一维度多个特征可以被整合成客体记忆的结果只被少数研究证实，大量研究发现同一维度的多个特征不能被整合记忆，这形成了弱客体理论的基本观点。为了解决两大理论之间的争议，本研究主要探究同维度特征能否被整合记忆。通过分析以往研究，我们认为实验范式和物体意义两个因素可能是导致之前大部分研究没有发现维度内特征能够被整合记忆的原因。因此，实验 1 采用回忆报告范式替代以往研究经常使用的变化觉察范式，结果发现，同一维度的多个特征难以被整合记忆。实验 2 以记忆无意义物体的特征为基线，探究在记忆有意义物体的特征时是否可能将多个特征进行整合记忆。结果发现，对于有意义物体的特征的记忆成绩并没有显著好于记忆无意义物体特征的成绩，说明即使采用具有较强整合线索的有意义物体作为载体，同一维度多个特征也难以被整合记忆。两个实验结果进一步支持了弱客体理论。

关键词 视觉工作记忆；特征整合；弱客体理论

分类号 B842

1 引言

视觉工作记忆系统是工作记忆系统的重要组成部分，它使我们能够在现实生活中具备保持并使用来自外部环境信息的能力(Baddeley, 2000, 2010, 2012)。有研究表明视觉工作记忆系统的容量与流体智力相关(Fukuda, Vogel, Mayr, & Awh, 2010; Vogel, McCollough, & Machizawa, 2005)，跟注意控制和学习能力也存在相关(Suchow, Fougnie, Brady, & Alvarez, 2014)，是人类认知系统的重要组成部分(Luria & Vogel, 2011)。因此，探究视觉工作记忆系统的工作机制、存储单位以及容量问题，是认知神经科学研究中的重要课题，已经成为了当下认知心理学、发展心理学研究的热点问题(Luck & Vogel, 2013; Oh & Leung, 2010)。

视觉工作记忆的存储模式是当前视觉工作记忆研究的焦点问题，吸引了许多研究者的兴趣。早期研究者认为，视觉工作记忆系统有 3~4 个存储单元，每个存储单元可以存储一个物体，在单个物体的信息被存储时，不管这些信息是否被当前任务需求，其包含的所有特征信息(不同维度的特征以及同一维度内的多个特征)都将被自动储存到一个存储单元，这形成了客体理论的基本观点(Gajewski & Brockmole, 2006; Luck & Vogel, 1997; Luria & Vogel, 2011; Quinlan & Cohen, 2011; Vogel, Woodman, & Luck, 2001)。按照客体理论，记忆成绩只受需要记忆的物体数量的影响，而与需记忆物体的信息数量无关。Luck 和 Vogel (1997)通过变化觉察范式测试并比较被试记忆物体的单一维度特征和两个或多个不同维度联合特征的记忆绩效。在实验中，被试需记忆的物体数量为 2、4、6 项。这一设置的重要逻辑是当被试需要记忆的物体数量(任务集)大于工作记忆容量(平均为 3~4 项)时，如果同一物体的多个特征不能被以客体的方式进行记忆存储，那么需记忆的单个物体的特征越多，记忆单个物体的全部信息所需的存储单元也将越多，而个体的存储单

收稿日期: 2016-06-28
* 国家自然科学基金面上项目(31571123)。
通信作者: 刘 强, E-mail: lq780614@163.com

元数是固定的, 因此个体能记住的物体数量将降低, 最终导致记忆正确率下降; 而如果多个特征能够被以客体的方式存储记忆, 那么记忆一个特征和记忆多个特征之间, 在记忆资源的需求上将没有差异, 因此不会出现记忆正确率的差异。实验结果发现, 被试在记忆不同数量的物体时, 两种条件下的记忆绩效(准确率)没有显著差别。进而, 他们比较了被试在记忆物体的颜色特征时, 记忆仅由一个颜色组成的物体和由两个颜色联合组成的物体条件之间的记忆绩效差异, 结果发现两者之间同样没有显著差别。此外, Luria 和 Vogel (2011)还利用可以精确反映个体视觉工作记忆系统的存储数量的 ERP 指标 CDA, 探讨了同一维度多个特征能否被以客体的形式进行存储记忆。他们在实验中设置 3 个条件, 条件一是只需记忆一个单一颜色物体的颜色, 条件二是记忆一个双颜色物体的颜色, 条件三是记忆两个单颜色物体。结果发现, 在记忆保持前期, 记忆一个单颜色物体的 CDA 波幅要低于记忆一个双颜色物体的 CDA 波幅, 而记忆两个单颜色物体的 CDA 波幅要高于记忆一个双颜色物体的 CDA 波幅。但是在记忆保持的后期, 记忆一个双颜色物体和单颜色物体的 CDA 波幅没有显著差别, 但都小于记忆两个单颜色物体的 CDA 波幅, 这说明同一维度的多个特征信息能够在视觉工作记忆中被以客体的方式进行整合存储, 只是这种整合需要时间。以上研究结果为客体理论假设提供了实验证据支持。

然而近年来, 研究者在 Luck 和 Vogel (1997)的实验基础上, 开展了关于记忆具有同维度多特征物体的一系列实验, 却难以重复其结果。例如, Olson 和 Jiang (2002)重做了 Luck 和 Vogel (1997)的记忆同一维度双特征(颜色)物体的实验, 但没有能够重复 Luck 和 Vogel (1997)的实验结果。他们的结果显示, 双特征条件的正确率显著低于单特征条件, 表明双特征条件下的特征不能被整合为一个客体进行记忆。作者认为该结果可能是由于实验条件混合呈现, 以及采用的记忆颜色材料较难区分等因素导致的。为了让实验设置更接近 Luck 等人的实验设置, 他们进一步改变记忆颜色材料的对比度, 且将不同条件之间混合呈现改为独立实验组块呈现。但实验结果仍然没能发现支持客体理论的证据。此外, Parra, Cubelli 和 Sala (2011a)在实验中设置两个记忆条件, 颜色独立记忆条件和颜色联合记忆条件。在颜色独立记忆条件下, 记忆刺激为几个嵌套色块, 探测刺激为嵌套色块的颜色改变或者保持不变。被试的任务是记住物体的两个颜色, 不需要记忆内、外部色块之间的捆绑关系。研究者认为这一任务模式更容易让被试采取特征记忆策略。在颜色联合记忆条件下, 记忆刺激与颜色独立条件相同, 但探测刺激在记忆变化情况下为两个嵌套色块的内部或外部色块互换, 此条件下被试只有记忆内外部色块的颜色及两者间的绑定关系才能有效地完成任务, 因此更容易让被试形成客体记忆。实验结果发现, 颜色联合记忆条件的正确率显著低于颜色独立记忆条件, 说明颜色联合记忆条件下的内外部色块没有被整合为客体记忆。以上的系列研究结果表明, 同一维度的多个特征信息无法被整合成客体进行记忆, 这难以用客体理论进行解释。鉴于客体理论的局限性, 一些研究者进一步提出了弱客体理论对其进行修正。该理论认为视觉工作记忆系统是由众多存储特征信息的子系统组成, 不同维度的特征信息独立存储在相应的子系统中, 每个子系统具有容量有限的记忆资源且系统之间不会相互占用, 因此在记忆物体的多个维度的单特征时, 不会影响在某一维度上能够记忆的最大数量, 而在要求记忆物体的同维度的多个特征时, 则会降低能够记忆的最大数量(Delvenne & Bruyer, 2004; Olson & Jiang, 2002; Parra, Abrahams, Logie, & Sala, 2009; Parra, Sala, Logie, & Abrahams, 2009; Parra et al., 2011b)。

综上所述, 大量研究者因为没有证明出同维度特征可以被整合成客体记忆, 进而将客体理论修改为弱客体理论。但是, 分析以往相关研究可以发现, 同一维度的特征不能被整合记忆, 可能来自于两个方面因素。

首先, 这些研究大多采用以颜色为记忆材料的变化觉察范式来探测同维度间的特征整合记忆问题。然而, 由变化觉察范式得出的结果可能会受到决策阶段误判因素的污染。因为, 对于每个特征是否变化的判断存在一定的错误率, 而联合特征条件下单个物体的特征数是单特征条件的 2 倍, 因此在变化觉察范式中联合条件下需要进行两次比较, 才能对一个物体做出是否改变的判断, 这将可能增大错误判断出现的概率, 从而导致联合条件的正确率低于单特征条件。相比变化觉察范式, 回忆报告范式在探测阶段让被试回忆线索指定的特征, 能够直接考察被试是否记住物体的每个特征, 进而通过分析同一物体两个特征的记住试次分布之间的关联性, 可以直接确定两个特征是否同时被记住, 因此可以排除变化觉察范式测量中可能存在的混淆因素。

其次，以往研究大多采用无意义物体作为记忆信息的载体，例如将两个颜色平均分布在一个无意义物体的两个部分上。而无意义物体对于被试来说没有特殊意义，其各个部分之间的联系较弱，整合不同部分的颜色信息的线索也将较弱，被试可能更倾向采用一种独立的方式记忆物体的不同特征。Kaiser, Stein 和 Peelen (2015)采用延迟的变化觉察范式发现，相比物体不同部分按照不规则规律呈现，当物体的不同部分根据现实世界的典型规律呈现时，被试的视觉工作记忆成绩更好。该结果表明当物体根据现实世界的规律呈现时，物体在视觉工作记忆中能被更有效的存储。此外，脑成像研究发现在物体不同部分的位置根据现实世界中的经验呈现时，会形成一种高水平的聚合作用，降低物体各个部分之间的注意竞争，更有效的促进加工(Kaiser, Stein, & Peelen, 2014)。因此，以往研究没能发现同一维度的多个特征组成的物体可以被整合记忆的原因很有可能是，整合线索的有效性不够强所致。

鉴于以上分析，在本实验中我们将通过两个实验对客体同维度特征的视觉工作记忆存储机制做进一步的探讨。在实验 1 中，我们将采用与以往研究相同的嵌套色块呈现方式，但将实验范式改为回忆报告范式，以解决以往研究在实验范式上可能存在的问题。在实验 2 中，我们将采用以往实验所常用的变化觉察范式，但将颜色放在有意义的物体上呈现，探究有意义物体作为载体时，同一维度内的多个特征能否被整合记忆。我们假设，如果采用回忆报告实验范式(实验 1)和具有较强整合线索的刺激材料(实验 2)，能够发现同一维度的多个特征可以被整合记忆，说明客体理论是成立的。但是若两实验都难以发现同一维度的多个特征能够被整合记忆，将支持弱客体理论。

2 实验 1：基于回忆报告范式的同维度多特征整合记忆探测

2.1 实验设计与假设

本实验采用嵌套色块作为记忆材料，以经典的回忆报告范式作为实验范式，通过比较回忆同一个物体不同部分颜色的记忆偏差值，探究被试是否能将不同部分的颜色整合成客体记忆，从而为解决客体理论和弱客体理论之间的争议提供进一步的实验支持。实验任务分为两种，一是要求被试对嵌套颜色的外部色块进行回忆；二是对嵌套颜色的内部色块进行回忆。

客体理论假设视觉工作记忆的存储单位为客体，不管物体有多少维度的特征，以及在每个维度上有多少个不同的特征，该物体的所有特征都将被存储在一个存储单元里。即当一个物体被记住时，物体上的所有特征都将被记住；当物体没有被记住时，物体上的所有特征都不会被记住(Fougnie & Alvarez, 2011)。而弱客体理论则强调，一个物体的不同特征可以被同时储存在一个存储单元中，但是在每个维度则只能储存一个特征。因此我们假设，如果回忆报告范式测得的同一物体不同部分的记忆偏差值之间不存在相关，即当一个特征没有被记住时，另外一个特征还能被正确回忆，说明同一维度多个特征组成的物体难以被整合成一个客体进行记忆，支持弱客体理论；相反，如果两个部分的偏差值存在相关，即两个特征或者都能被回忆出，或者都不能被回忆，说明同一维度的多个特征可以被整合成客体进行记忆，从而支持客体理论。

2.2 实验方法

2.2.1 被试

22 名(7 男，15 女)来自辽宁师范大学的本科生和研究生参与本实验，年龄范围从 18 岁到 27 岁。所有参与者视力或矫正视力正常，没有精神疾病，无色觉障碍。实验前阅读并签署知情同意书，参与者会进行大约 1 个小时的实验，实验结束后，每个实验者会得到相应的报酬。整个研究已经通过了学校伦理委员会的审核。

2.2.2 实验设施及材料

每个记忆项都是由外部色块套内部色块的嵌套色块组成，外部色块的视角为 1.3°×1.3°，内部色块的视角为 0.65°×0.65°。外部色块和内部色块的颜色分别从一个均匀分布的 360 等份颜色色环上随机选取而来，外部色块与内部色块的颜色之间的差值至少在 30 度以上。

所有刺激呈现在位于屏幕中央的一个 9.8°×7.3°的虚拟框中，屏幕背景为灰色(128, 128, 128)，任意两个刺激的中心点与屏幕中央之间的距离不小于 4°。刺激呈现在一个像素为 1280×1024，刷新频率为 60 Hz 的 CRT 显示器上，被试距离计算机屏幕 60 cm。被试在光线柔和稳定且舒适的行为实验室中完成实验任务。

2.2.3 实验程序

实验采用以颜色作为刺激材料的回忆报告范式，该范式要求被试根据线索位置的提示，在色环上找到对应线索位置的记忆颜色信息。实验流程如

图 1 所示。每个试次开始时，屏幕会先呈现 200 ms 的灰色空屏，接下来呈现 500 ms 的记忆阵列，随后呈现 900 ms 的空屏，之后会随机呈现一个探测项。在记忆阵列呈现时，被试的任务是记住记忆阵列中呈现的 3 个嵌套颜色(共 6 种颜色)。在探测项出现时，被试需要执行两个任务，任务一是当较大白色正方形出现，被试需要回忆与该白色正方形位置对应的记忆物体的外部色块的颜色，并在色环上找出该颜色并点击鼠标左键；任务二是当较小的白色正方形出现，被试需要回忆与该白色正方形位置对应的记忆物体中嵌套的内部色块的颜色，然后在色环上找出该颜色并点击鼠标左键。两个探测任务出现的先后顺序随机，被试无法预知回忆任务的顺序。

正式实验开始前，每名被试需要完成 20 个练习试次，以熟悉了解实验要求。接下来完成 520 个测试试次。

2.2.4　数据分析

我们使用 Zhang 和 Luck (2008)的分析方法来检测不同条件下的记忆成绩。针对每个被试的每个条件，计算出每个试次记忆颜色的实际值和反应值之间的差异值($\hat{\theta}$)。然后用两成分混合模型对差异值进行数据拟合。混合模型采用如下的函数，

$$p(\hat{\theta})=(1-p_g)\phi_\sigma(\hat{\theta})+p_g\frac{1}{2\pi}$$

$\hat{\theta}$是差异值，p_g 是在反应中的猜测率，ϕ_σ 是一个类似于高斯分布的冯·米塞斯分布(VonMises distribution)，其标准差为σ。该模型中存在两个成分，第一个成分是有效记忆成分，假如刺激进入了被试的记忆表征，那么这会导致差异值为一个集中的冯·米塞斯分布，该分布具有平均值(μ)以及标准差 SD (σ)。第二个成分是猜测成分，假如刺激没有被记住，那么被试在报告时将进行随机猜测，这会导致差异值为均匀分布(uniform distribution)。在这个函数的基础上，使用最大似然估计法(standard maximum-likelihood methods)对测量数据进行拟合，以获得各个函数参数。

在这里我们主要关注物体被记住的比率($1-p_g$)，因为通过比较一个特征被遗忘时，另外一个特征的记忆情况，就能推测出记忆多特征物体的模式。我们首先通过拟合分别得出被试记忆外部色块和内部色块的记忆率(标准条件)。进而，我们分析被试在没有记住外部(内部)色块颜色的试次中，是否记住了内部(外部)色块的颜色。具体方法如下，将被试在外部色块反应值和目标实际值之间的差值大于 3 个标准差的试次(图 2A 的浅灰色部分)筛选出来，该部分试次属于被试没有记住外部色块的内容而随机猜测的试次。再对这些试次中的内部色块的响应偏差值，采用混合模型再进行拟合，获得被试记忆内部色块的记忆率(过滤条件)。随后，我们采用同样的方法获得被试在过滤条件下对外部色块的记忆率。2 名被试由于回忆报告的记忆率过低，其数据在分析中被剔除。

2.3　结果与讨论

各个条件下的记忆率如图 3 所示。对模型拟合后的记忆率进行 2(条件：标准条件，过滤条件)×2(特征类型：外部色块，内部色块)重复测量方差分析，结果如下：条件间的主效应[$F(1, 19) = 0.18$, $p = 0.68$, $\eta^2 = 0.01$]、特征类型的主效应[$F(1, 19) = 0.78$, $p = 0.39$, $\eta^2 = 0.04$]以及两者之间的交互作用[$F(2, 38) = 1.71$, $p = 0.21$, $\eta^2 = 0.08$]均不显著。

因为每个试次中被试需分别对外部色块(颜色特征 A)和内部色块(颜色特征 B)两个特征进行两次反应。而过滤试次是对某一个特征 A 的反应偏差值超过 3 倍 SD 的试次，该部分试次可以被认为是没有记住特征 A 的试次。进而将这些试次独立出来，单独分析这些试次中，被试对另外一个颜色特征 B 的响应偏差值。通过 Zhang 和 Luck (2008)的模型，对过滤试次中特征 B 的偏差值进行拟合。如果被试没有记住特征 B，在回忆特征 B 时，被试的响应值相对于特征 B 将是等概率分布，拟合出的概率密度函数应该是一条直线。反之，如果反应值呈现以特征 B 为均值的高斯分布，则说明存在只记住单个特

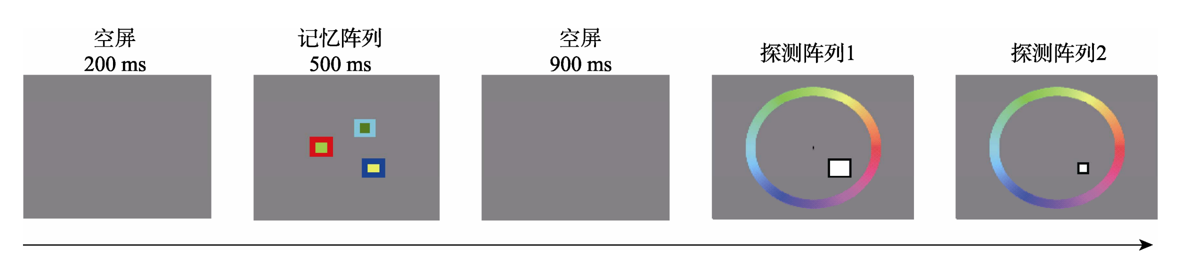


图 1　回忆报告范式的流程图，探测阵列 1 和探测阵列 2 的位置随机出现

注：彩图见电子版，下同

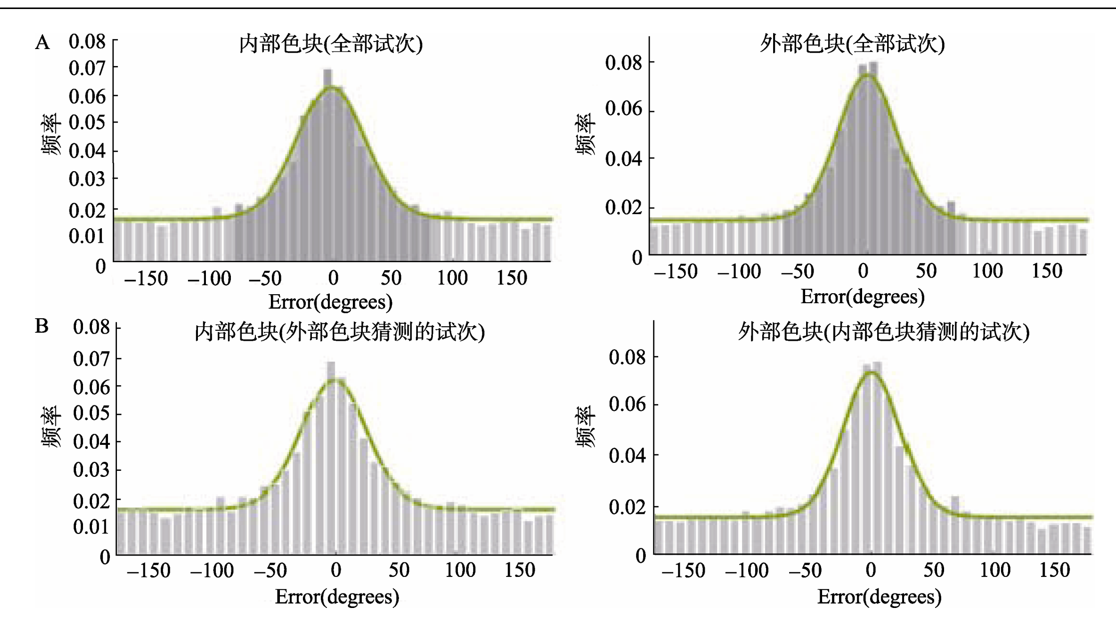


图 2　A)被试在全部试次中内部色块(左边)和外部色块(右边)上反应偏差的分布(标准条件)B)被试在猜测一个特征时，另外一个特征的偏差分布图(过滤条件)。注：浅灰色区域为被试的反应偏差小于 3 个标准差的区间，落入该区间的试次为猜测的试次，图中的绿线是每个条件下最优拟合。

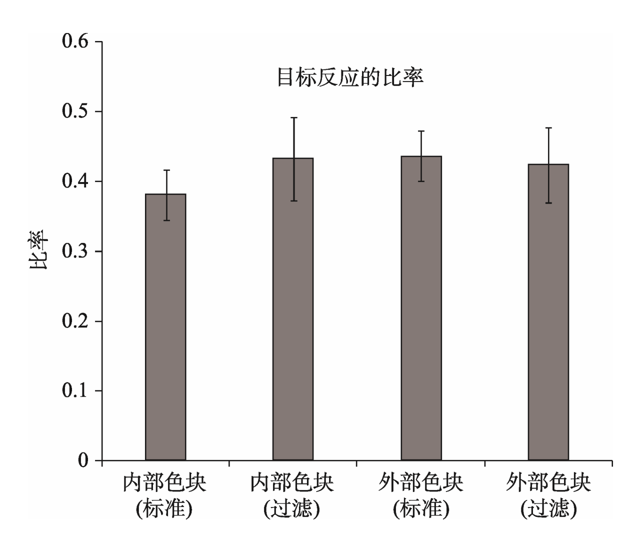


图 3　模型拟合标准条件和过滤条件(剔除小于 3 个标准差)下的记忆率

征的情况。而出现后一种情况将无法支持客体理论，因为客体理论假设，被试要么把一个物体的所有特征都记住，要么所有特征都没记(Fougnie & Alvarez, 2011)。实验一的结果发现过滤后试次的反应分布不是一条直线，而是呈现出高斯分布(如图 2B 所示)。比较拟合后的参数发现，对于一个特征被遗忘的试次，另外一个特征被记住的比率较大(记忆率大约 0.4)。此外，我们采用 Fougnie 等人的独立指数(SI)来表示特征之间的记忆独立性。独立指数是用过滤试次中目标反应的比率比上所有试次中目标反应的比率。独立指数越高说明特征之间的独立性越高。本实验中 SI = 0.93，说明当记忆由嵌套颜色组成的实验材料时，被试很难将其整合成客体记忆，两个颜色是独立存储的。

一个可能的解释是被试采用了偏向记忆某一部分颜色的记忆策略，从而阻碍了将两个特征进行整合记忆(Olson & Jiang, 2002)。但进一步分析发现，外部色块和内部色块的记忆率没有显著差别。这一结果可以排除被试由于记忆偏好，只记忆外面的色块或只记忆里面的色块导致嵌套物体没有整合的可能性。因此，实验一的结果不支持物体的同一维度多个特征能够被整合记忆。

3　实验 2：基于有意义物体的同维度多特征整合记忆探测

3.1　实验设计与假设

实验 2 采用 Luck 和 Vogel (1997)的研究范式—变化觉察范式，但在记忆材料上使用有意义的物体材料作为载体，以提高整合记忆多特征信息的有效性。由于有意义物体的形状多样性，本研究在物体的颜色分布模式上没有采用 Luck 等人的嵌套式分布，而是把两个不同的颜色分布在物体的上半部分和下半部分，这样可以让被试较容易编码每个部分的颜色信息(Xu, 2002)。同时，在实验中我们将无意义物体作为基线对比条件进行测试，通过对比记忆双特征条件时有意义和无意义记忆条件的记忆成绩差异，将有益于确定物体意义本身是否有助于促进多特征的整合记忆。由于有意义物体的颜色难以

通过程序自动化设置, 实验 2 的刺激颜色没有像实验 1 一样从 360 种颜色中随机选取, 而是选取几种差别比较大的颜色提前设置到物体表面上做成图片, 在实验中随机调取。

如果客体理论假设是成立的, 且之前的研究得不到同维度特征被整合成客体记忆的结果的原因, 是由于所呈现的记忆刺激缺乏意义所导致。那么我们将可能在有意义物体上观察到同维度特征被整合成客体记忆的结果。相反, 如果弱客体理论是普遍成立的, 那么无论记忆刺激呈现在无意义物体上还是有意义物体上, 都不会发现同维度特征被整合成客体进行记忆的结果。

3.2　实验方法

3.2.1　被试

20 名(8 男, 12 女)来自国内辽宁师范大学的学生自愿参加本实验。他们的年龄从 18 岁到 26 岁不等。所有被试视力或者矫正视力正常, 没有精神疾病史, 无色觉障碍。实验前阅读并签署知情同意书, 参与者会进行大约 1 个小时的实验, 实验结束后, 每个实验者会得到相应的报酬。整个研究已经通过了学校伦理委员会的审核。

3.2.2　实验设施及材料

实验程序由 E-prime 1.0 编写而成。我们选取了日常生活中经常见到的具有典型空间结构的 4 个有意义物体(高：1.5°)作为刺激材料。4 个物体分别为：台灯, 水杯, 水壶, 瓶子。同时从以往研究中选取 4 个比较典型的任意多边形作为无意义实验部分的刺激材料(大小：1.5°×1.5°), 如图 4B 所示(Alvarez & Cavanagh, 2004; Awh, Barton, & Vogel, 2007; Eng, Chen, & Jiang, 2005)。我们将每个实验材料分成上、下高度相等的两部分, 作为单特征条件下的实验材料。利用 3d-Max 软件系统, 给每个物体的上下部分分别附上不同的颜色信息。6 个颜色被选作刺激材料, 依次为：红[233, 0, 0], 绿[30, 138, 18], 蓝[26, 49, 178], 薄荷绿[75, 246, 255], 黄[231, 228, 66], 紫[156, 0, 158] (Ye, Zhang, Liu, Li, & Liu, 2014)。

所有刺激呈现在屏幕中央一个 9.8°×7.3°的虚拟框中, 任意一个物体的中心点与屏幕中央之间的距离不小于 4°。刺激呈现在一个像素为 1280×1024, 刷新频率为 60 Hz 的 CRT 显示器上, 被试距离计算机屏幕 60 cm。被试在光线柔和且舒适的行为实验室中完成实验任务。

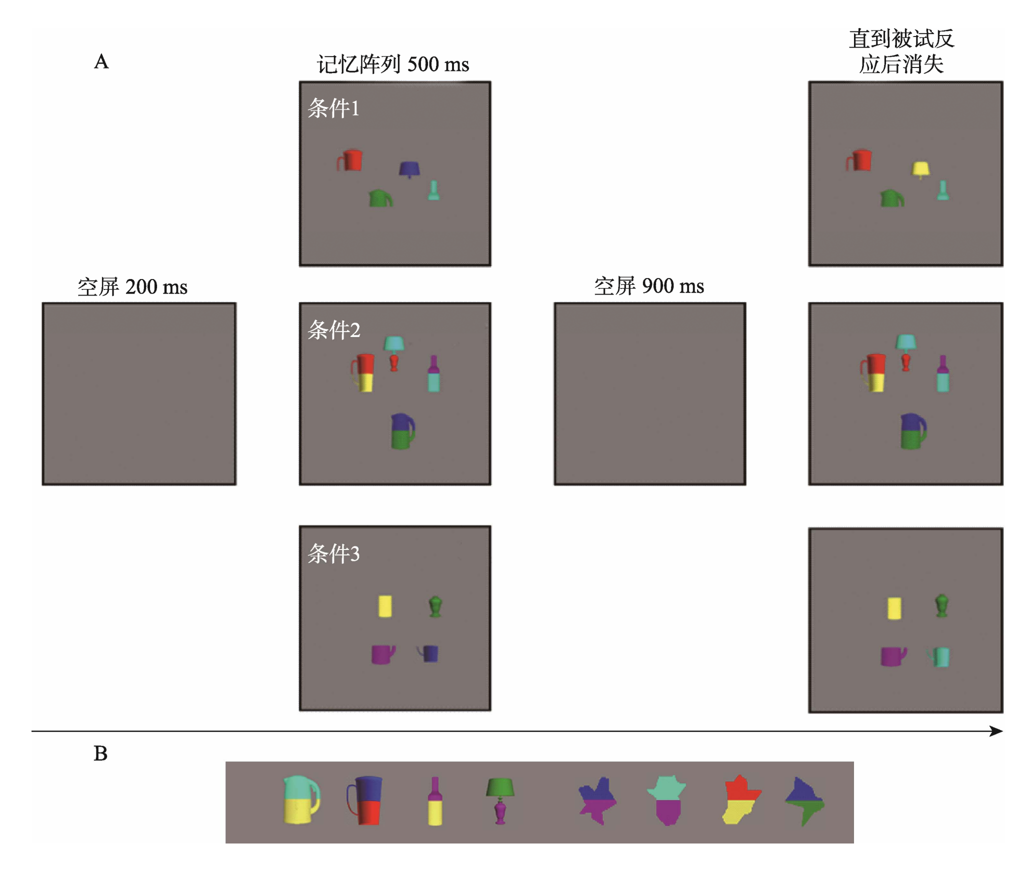


图 4　其中 A 为变化觉察范式的流程图; B 为有意义物体材料(左四)和无意义物体材料(右四)示例
注：条件 1 需要记忆物体的上部颜色; 条件 2 需要记忆物体的所有颜色; 条件 3 需要记忆物体的下部颜色

3.2.3 实验程序

实验流程如图 4A 所示。实验首先会呈现 200 ms 的灰色空屏，接着呈现一个 500 ms 的记忆阵列，记忆阵列为在虚拟框中 4 个随机的位置上出现的 4 个物体，该阵列出现时，要求被试记忆所有物体的颜色。900 ms 的灰色空屏之后，探测阵列出现，被试的任务是将其与记忆阵列进行比较，辨别探测阵列中颜色是否发生改变，只要发现其中一项发生改变就按“J”键，都没有发生改变按“F”键，探测阵列在被试按键结束后消失。

实验中，被试需要依次执行 3 种不同的颜色记忆任务，分别为记忆物体上部、记忆物体下部、记忆物体整体。这 3 种任务分别在两种不同的记忆材料(有意义物体，无意义物体)上单独实验组呈现。在同一组正式实验中，物体的记忆类型、记忆材料保持不变。并且记忆阵列与探测阵列相比，同一位置上物体形状不会发生改变，只有颜色可能发生改变。因此，记忆物体整体条件下的颜色数量是部分记忆条件下颜色数量的一倍。整个实验总共 6 个条件，每个条件 12 个练习试次，96 个测试试次。每个条件下 50%试次的正确反应为“发生改变”，即记忆项和探测项相比，其中一个位置上探测项的颜色发生改变，50%试次的正确反应为“没有发生改变”，即同一位置上的记忆项和探测项的颜色保持不变。

3.3 结果与讨论

不同条件下的正确率如图 5 所示。为了探究各个条件下的差异，对正确率进行 3(记忆类型：上部记忆，联合记忆，下部记忆)×2(记忆材料：无意义物体，有意义物体)重复测量方差分析。结果发现记忆类型存在主效应，$F(2, 38) = 89$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.82$；但是记忆材料的主效应不显著，$F(1, 19) = 0.32$, $p = 0.59$；记忆类型和记忆材料的交互作用边缘显著，$F(2, 38) = 3.01$, $p = 0.065$, $\eta^2 = 0.14$。进一步分析发现，有意义物体上整体记忆颜色和无意义物体上整体记忆颜色差异不显著，$F(1, 19) = 0.34$, $p = 0.568$；记忆有意义物体上半部颜色和无意义物体上半部颜色差异边缘显著，$F(1, 19) = 3.31$, $p = 0.085$；记忆有意义物体下半部颜色和无意义物体下半部颜色差异不显著，$F(1, 19) = 0.04$, $p = 0.848$。由于记忆有意义物体上半部颜色和无意义物体上半部颜色之间存在边缘显著，导致了记忆类型和记忆材料的交互作用边缘显著，而其他两个条件(记忆下半部、记忆整体)并不存在显著差异。

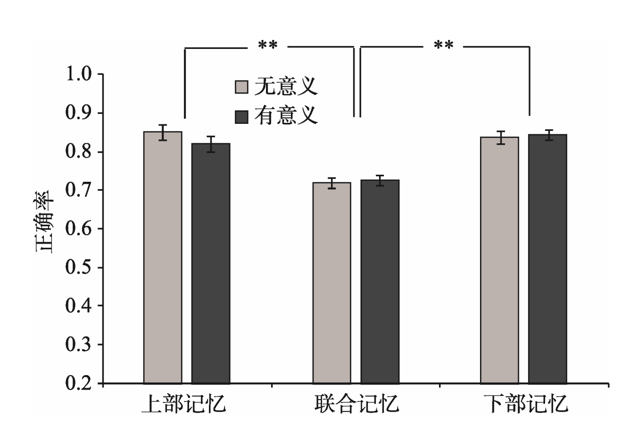


图 5 三种记忆类型(上部记忆、联合记忆、下部记忆)在两种记忆材料下(有意义、无意义)的正确率

注：**表示 $p < 0.01$

上部记忆和联合记忆存在显著差异，$t(39) = -10.1$, $p < 0.01$；联合记忆和下部记忆存在显著差异，$t(39) = -15.5$, $p < 0.01$；但上部记忆和下部记忆不存在显著差异，$t(39) = -0.7$, $p = 0.51$。

以上分析结果表明，单特征记忆条件下视觉工作记忆的成绩，要高于双特征联合记忆条件下的记忆成绩，并且无论特征呈现在无意义物体还是有意义物体上，这种单特征记忆的优势都存在。以往研究多采用嵌套色块的方式，发现被试难以将多个同维度特征整合成客体进行记忆(Olson & Jiang, 2002; Wheeler & Treisman, 2002)，这与本研究在无意义物体条件下所发现的结果相一致。而对于有意义物体条件，即使其具有较强的整合线索，同样难以发现同维度特征可以被整合记忆，因此可以认为同维度特征无法被整合成客体记忆具有普遍性，与特征呈现的载体材料无关。此外，研究结果发现记忆有意义物体上半部颜色和无意义物体上半部颜色之间存在边缘显著。这可能是由于，有意义物体的上半部分单独呈现时体现了更多有意义物体的特征，而物体的残缺可能会在部分试次将被试的注意吸引到物体的身份属性上，从而导致被试编码存储任务相关颜色信息的时间减少，最终导致记忆正确率的微弱下降。

4 总讨论

本研究主要考察的问题是，当采用避免决策误差因素的回忆报告范式和更倾向产生客体整合的特征呈现的物体载体时，同一维度多个特征组成的物体能否以客体的形式被存储在视觉工作记忆系统中。实验 1 结果显示，当采用回忆报告范式代替以往常用的变化觉察范式时，不能获得整合记忆同维度多个特征的证据。实验 2 即使采用整合线索更

有效的有意义物体作为记忆特征的呈现载体, 也仍然得到与实验 1 一致的结果。两实验共同说明, 同维度多个特征不能被整合为客体进行记忆, 因此不支持由 Luck 和 Vogel (1997)提出的同一维度特征可以整合成客体的理论假设。本研究结果结合以往的研究发现, 维度间特征可以很好的被整合成客体进行记忆(Luria & Vogel, 2011; Olson & Jiang, 2002; Wheeler & Treisman, 2002; 薛成波, 叶超雄, 张引, 刘强, 2015), 表明个体的视觉工作记忆容量会受到客体和特征的共同限制, 一致于弱客体理论假设。

实验 1 发现同一维度多个特征在回忆报告范式中难以被整合记忆, 此结果符合以往采用变化觉察范式的结果(Parra et al., 2011b; Xu, 2002), 说明同维度特征无法被整合记忆与实验范式无关。但有研究表明, 当不同物体呈现于同一位置时, 不同实验范式会影响物体间的整合。Balaban 和 Luria (2016)采用变化觉察范式和物体回溯范式探究了颜色块和方向条在同一位置上的整合。在物体回溯范式中, 首先在启动阶段呈现一个任务无关的颜色块和方向条组成的组合物体, 紧接着探测阶段在同一位置再出现另外一个颜色块和方向条组成的组合物体, 被试需要尽可能快地判断出组合物体中条形的方向是垂直还是水平。结果发现在物体回溯范式条件下, 相比于启动阶段呈现组合物体, 探测阶段两个物体部分改变要比两个物体全部改变或全部不变的反应时间更慢, 据此他们认为两个物体被整合成了一个客体进行记忆。但在变化觉察范式中同一个位置上两个物体的正确率要低于一个物体的正确率, 因此没有发现整合记忆现象。作者认为物体回溯范式任务更简单, 没有强调物体之间的独立性, 只需观察一个维度的特征。而在变化觉察范式中, 因为每个刺激是独立变化的, 并不是整体变化, 被试更容易形成独立性的策略。因此, 实验范式可能在客体整合中存在重要的作用。按此解释, 本研究的实验 1 的结果也许是源自在回忆报告范式下, 被试更倾向于将同一物体的两个特征独立记忆所导致, 仍不能排除维度内特征可以被整合的可能性。但本研究的实验任务是回忆同一位置上出现的所有特征, 并不是像变化觉察范式一样改变部分特征让被试进行探测。如果存在整合记忆的可能性, 被试采取整合记忆模式对两个特征进行整合记忆, 在记忆提取时先整体回忆物体的所有特征, 然后再分别完成物体各部分特征的再现, 将更有效的完成任务。因此, 与以往探测阶段只探测部分特征的变化觉察范式相比, 当前的实验任务更加强调特征的整合记忆。进而, 如果同一维度的多个特征不能被整合成客体进行记忆, 又该如何解释 Balaban 和 Luria (2016)的实验中所发现的探测阶段两个物体部分改变要比两个物体全部改变或全部不变的反应时间更慢的现象? 我们认为, 这可能是由于, 物体的两个部分同时改变或者同时不改变更容易引起被试的察觉, 导致被试更容易做出判断。进而, 物体回溯范式虽然没有强调物体的独立性, 但是其实验任务过于简单, 每次任务只呈现一个物体, 即使按照物体的两部分独立进行记忆, 也小于被试的工作记忆容量。所以, 物体回溯范式也很难区分物体的两个部分是以整体的方式还是以独立的方式被储存进视觉工作记忆系统中。而在本研究所采用的回忆报告范式中, 只有出现一个特征猜测另一个特征也猜测的结果, 才能证实两个特征被整合记忆。因此, 相比物体回溯范式, 回忆报告范式可以更直接且精确的验证整合记忆。

实验 2 通过设置两个对比条件: 有意义物体、无意义物体条件, 考察在有意义物体条件下是否能够获得整合记忆的结果(Brady, Konkle, Alvarez, & Oliva, 2013)。结果表明, 无论有意义物体还是无意义物体条件下, 双特征联合记忆的成绩都要低于部分记忆的成绩, 说明同一维度多个特征组成的物体无法被整合成客体进行记忆。然而, Kaiser 等人(2015)的研究发现, 当两个物体按照现实世界中的经验规律放置时, 能够促进视觉工作记忆的成绩。他们选取现实中的一对物体按照现实规律放置, 结果发现被试很容易记忆所有物体, 例如台灯和桌子、太阳伞和沙滩躺椅等, 这似乎与我们的结果相悖。但分析他们的实验任务可以发现, 首先探测方式是配对物体中的一个物体保持不变, 另一个物体改变为其他物体, 即并不是探究同一维度不同特征的改变而是物体的改变。其次, 就其探测任务而言, 如果被试同时记住两个物体之间的关系, 并在测试阶段利用关系的改变辅助做出决策, 即使两物体没有整合也将同样提高任务绩效。因此, 所谓记忆绩效的提高可能并不是来自于记忆阶段的两个物体的整合, 而是来自于被试策略的记忆了物体间的关系并辅助决策判断所导致的决策绩效的提高。在当前的实验 2 中, 刺激的意义属性虽然也可被看成物体的两个部分之间的关系属性, 但是这一关系属性只表达在形状维度上, 而形状维度在探测阶段不会发生改变。因此, 我们的实验结果可以排除记忆关

系属性辅助决策判断的因素。

综合实验 1 和实验 2 的结果表明，即使采用避免决策误差因素的实验范式以及更倾向特征整合的记忆材料，仍然不能观察到同一维度不同特征被整合为客体记忆的结果，从而为弱客体理论提供了支持证据。

5 结论

实验 1 采用回忆报告范式发现，被试回忆同一物体的两个颜色特征时,它们的记忆成绩之间不存在相关性，从而无法支持特征进行了整合记忆。实验 2 发现，即使采用有意义物体作为两个颜色的呈现载体，两个同一维度特征仍不能被整合记忆。两个实验结果，为弱客体理论提供了支持证据。

参 考 文 献

Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The capacity of visual short-term memory is set both by visual information load and by number of objects. *Psychological Science, 15*(2), 106–111.

Awh, E., Barton, B., & Vogel, E. K. (2007). Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychological Science, 18*(7), 622–628.

Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences, 4*(11), 417–423.

Baddeley, A. (2010). Working memory. *Current Biology, 20*(4), R136–R140.

Baddeley, A. (2012). Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology, 63*, 1–29.

Balaban, H., & Luria, R. (2016). Integration of distinct objects in visual working memory depends on strong objecthood cues even for different-dimension conjunctions. *Cerebral Cortex, 26*(5), 2093–2104.

Brady, T. F., Konkle, T., Alvarez, G. A., & Oliva, A. (2013). Real-world objects are not represented as bound units: Independent forgetting of different object details from visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General, 142*(3), 791–808.

Delvenne, J.-F., & Bruyer, R. (2004). Does visual short-term memory store bound features? *Visual Cognition, 11*(1), 1–27.

Eng, H. Y., Chen, D., & Jiang, Y. (2005). Visual working memory for simple and complex visual stimuli. *Psychonomic Bulletin & Rreview, 12*(6), 1127–1133.

Fougnie, D., & Alvarez, G. A. (2011). Object features fail independently in visual working memory: Evidence for a probabilistic feature-store model. *Journal of Vision, 11*(12), 3.

Fukuda, K., Vogel, E., Mayr, U., & Awh, E. (2010). Quantity, not quality: The relationship between fluid intelligence and working memory capacity. *Psychonomic Bulletin & Rreview, 17*(5), 673–679.

Gajewski, D. A., & Brockmole, J. R. (2006). Feature bindings endure without attention: Evidence from an explicit recall task. *Psychonomic Bulletin & Rreview, 13*(4), 581–587.

Kaiser, D., Stein, T., & Peelen, M. V. (2014). Object grouping based on real-world regularities facilitates perception by reducing competitive interactions in visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111*(30), 11217–11222.

Kaiser, D., Stein, T., & Peelen, M. V. (2015). Real-world spatial regularities affect visual working memory for objects. *Psychonomic Bulletin & Rreview, 22*(6), 1784–1790.

Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature, 390*(6657), 279–281.

Luck, S. J., & Vogel, E. K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences, 17*(8), 391–400.

Luria, R., & Vogel, E. K. (2011). Shape and color conjunction stimuli are represented as bound objects in visual working memory. *Neuropsychologia, 49*(6), 1632–1639.

Oh, H., & Leung, H.-C. (2010). Specific and nonspecific neural activity during selective processing of visual representations in working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience, 22*(2), 292–306.

Olson, I. R., & Jiang, Y. (2002). Is visual short-term memory object based? Rejection of the "strong-object" hypothesis. *Perception & Psychophysics, 64*(7), 1055–1067.

Parra, M. A., Abrahams, S., Logie, R. H., & Sala, S. D. (2009). Age and binding within-dimension features in visual short-term memory. *Neuroscience Letters, 449*(1), 1–5.

Parra, M. A., Cubelli, R., & Sala, S. D. (2011a). Lack of color integration in visual short-term memory binding. *Memory & Cognition, 39*(7), 1187–1197.

Parra, M. A., Sala, S. D., Abrahams, S., Logie, R. H., Méndez, L. G., & Lopera, F. (2011b). Specific deficit of colour-colour short-term memory binding in sporadic and familial Alzheimer's disease. *Neuropsychologia, 49*(7), 1943–1952.

Parra, M. A., Sala, S. D., Logie, R. H., & Abrahams, S. (2009). Selective impairment in visual short-term memory binding. *Cognitive Neuropsychology, 26*(7), 583–605.

Quinlan, P. T., & Cohen, D. J. (2011). Object-based representations govern both the storage of information in visual short-term memory and the retrieval of information from it. *Psychonomic Bulletin & Rreview, 18*(2), 316–323.

Suchow, J. W., Fougnie, D., Brady, T. F., & Alvarez, G. A. (2014). Terms of the debate on the format and structure of visual memory. *Attention, Perception, & Psychophysics, 76*(7), 2071–2079.

Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature, 438*(7067), 500–503.

Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27*(1), 92–114.

Wheeler, M. E., & Treisman, A. M. (2002). Binding in short-term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General, 131*(1), 48–64.

Xu, Y. (2002). Limitations of object-based feature encoding in visual short-term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 28*(2), 458–468.

Xue, C. B., Ye, C. X., Zhang, Y., &Liu, Q. (2015). Memory

mechanism of feature binding in visual working memory. *Acta Psychologica Sinica, 47*(7), 851–858.
[薛成波, 叶超雄, 张引, 刘强. (2015). 视觉工作记忆中特征绑定关系的记忆机制. *心理学报, 47*(7), 851–858.]
Ye, C., Zhang, L., Liu, T., Li, H., & Liu, Q. (2014). Visual working memory capacity for color is independent of representation resolution. *PLoS ONE, 9*(3), e91681.
Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, *453*(7192), 233–235.

Storage mechanism of same-dimension features in visual working memory

WANG Jing; XUE Chengbo; LIU Qiang
(*Research Center of Brain and Cognitive Neuroscience, Liaoning Normal University, Dalian* 116029, *China*)

Abstract

Although visual working memory (VWM) has been studied for decades, the storage mechanism of VWM remains unclear. A strong object-based theory and a weak object-based theory have been proposed for the VWM storage mechanism. The arguments of these two theories focus on whether features from the same dimension can be integrated into the representation of objects stored in VWM. The strong object-based theory claimed that object was a unit of VWM, the capacity of which was not affected by the number of features. However, the recent studies have proved that weak object-based theory because the features from the same dimension (e.g., two colors) cannot be integrated simultaneously into the representation of objects in VWM, and the VWM capacity was constrained by the number of features. The aim of this paper is to explore whether features from the same dimension can be successfully integrated into a representation of objects stored in VWM. Based on the finding of previous study, we proposed that experimental paradigm and stimulus property might be the main factors that influence the integration of same-dimension information into a representation. Two experiments were conducted to test whether these two factors could affect the integration process respectively.

Experiment 1 used a recall task to investigate whether experimental paradigm is a main factor to influence the integration of same-dimension features. The results show that, no matter which experimental paradigms, participants were unable to integrated the same-dimension features into a representation. These suggests that experimental paradigm is not a main factor for explaining the failure of the integration of same-dimension features into a representation stored in VWM.

Experiment 2 was conducted to explore whether stimulus property could affect the integration of same-dimension features. Two types of stimulus were selected as experimental materials (e.g., meaningless and meaningful objects). We expected that, in meaningful object condition, participants would easily memorize two conjoint colors as one representation because of the integrated clues (the meaningful shapes); in contrast, participants were more likely to memorize the two features separately due to the absence of integrated clues. The results of Experiment 2 show that, the same-dimension features could not be integrated into one representation in both conditions (meaningful and meaningless objects). Thus, Experiment 2 suggests that the same-dimension features could not be integrated into a representation of objects stored in VWM, regardless of the integrated clues.

The present study provides supporting evidences for the weak object-based theory by claiming that manipulation of variables such as experimental paradigm and stimulus property exerts no effect on the memorization of same-dimensional features.

Key words　visual working memory; features integration; weak object-based theory